

1/5

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2002-512697

(P2002-512697A)

(43) 公表日 平成14年4月23日 (2002.4.23)

(51) Int. Cl. ⁷	識別記号	FI	テマート* (参考)
G 0 1 N 13/14		G 0 1 N 13/14	A
G 0 1 B 11/24		13/16	A
G 0 1 N 13/16		G 0 2 B 21/00	
G 0 2 B 21/00		21/02	
21/02		21/06	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 60 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願平11-504812	(71) 出願人	ビーコ インストルメンツ インコーポレイテッド
(86) (22) 出願日	平成10年6月18日 (1998. 6. 18)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 11803
(85) 翻訳文提出日	平成11年12月20日 (1999. 12. 20)		ブレインビュー ターミナル ドライブ (番地なし)
(86) 国際出願番号	PCT/US98/12719	(72) 発明者	ギスレイン レーシェン ビー.
(87) 国際公開番号	WO98/58288		アメリカ合衆国 カリフォルニア州 サン
(87) 国際公開日	平成10年12月23日 (1998. 12. 23)		タバーバラ クリフドライブ 323番 101
(31) 優先権主張番号	08/878, 987		6
(32) 優先日	平成9年6月19日 (1997. 6. 19)	(72) 発明者	エリングス バージル ビー.
(33) 優先権主張国	米国 (US)		アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9311
(81) 指定国	EP (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), CA, DE, JP		1 サンタバーバラ ピアクラリス 4664
		(74) 代理人	弁理士 澤木 誠一 (外1名)

(54) 【発明の名称】 固体界浸レンズを用いた走査プローブ光学顕微鏡

(57) 【要約】

走査プローブ顕微鏡は、空気中の回折リミットより良好な解像度を有する光学像を作るため高屈折率固体界浸レンズ (SIL) プローブ (10) を用いる。このSILプローブ (10) は、球形上面と、鋭いチップを有する円錐形 (または角錐形) 下面とを有する。球形面は周縁光の角度を増大するためSILは焦点スポットサイズを縮小し、高屈折率材料は、波長を短くする。この焦点スポットは、SILからの距離の指数関数的に減少する振幅を有する減衰波を作る。下面の鋭いチップはチップとサンプルとの接触面積と、チップとサンプル間の間隔を減少し、サンプルがSILプローブの近視野に位置される。サンプルは減衰波を動揺し、光検出器が光の特性をモニタする。片持ちレバー (14) はSILプローブ (10) を支持し、片持ちレバーの傾角センサ (16) はチップとサンプル間の押圧力及び分離を正確に制御する。光学データを作るためラスタパターン内でパターンをSILプローブ (10) によって走査するときチップとサンプル間のギャップを近視野内に維持するため力帰還ループで片持ちレバーの傾角センサ (16) を操

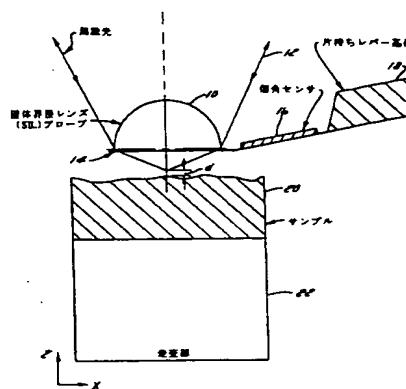
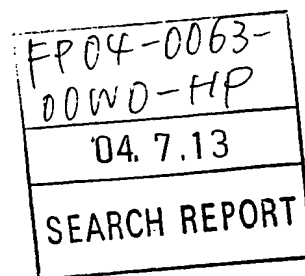


FIG. 1A



【特許請求の範囲】

1. a) サンプル支持体と、
b) 第1面と、プローブチップを形成する第2面とを有する、屈折率の大きい材料の固体境界レンズと、
c) 固体境界レンズの第2面上のプローブチップにおける焦点に固体境界レンズの第1面を介して光をフォーカスするための光学手段と、
d) 走査すべき面を有するサンプルから固体境界レンズ上のプローブチップ迄の距離を制御する垂直位置決め器と、
e) 固体境界レンズとサンプル支持体とを互に相対的に略水平面に沿って移動せしめるための走査器と、及び
f) 固体境界レンズの上面から放射される光を集めるための光学手段とより成る走査プローブ光学顕微鏡。
2. a) 上記固体境界レンズの第2面上の上記プローブチップがポイントを形成し、
b) 上記固体境界レンズの第1面を通る光を上記光学手段によってフォーカスして上記固体境界レンズ内の幾つかの光を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に投射せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作り、
顕微鏡に供給された光が、滑らかな及び粗いサンプル面の近くに位置決めされるプローブチップに隣接して小さなスポット光を形成し、顕微鏡から集められた光が検出され、解析されてサンプルの光学特性を測定し、空気中の屈折限界より良好な解像度の光学手段を作る
請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
3. 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが大きな曲率で湾曲している請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
4. a) 上記固体境界レンズ上のプローブチップが原子力顕微鏡のプローブとしての機能を果たす形状であり、
b) 上記垂直位置決め器が更に原子力顕微鏡制御及び測定手段を有し、
原子力顕微鏡として機能する請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。

能せしめ、解像度を向上せしめた請求項8記載の走査プローブ光学顕微鏡。

10. 上記固体境界レンズの第1面を通る光をフォーカスするための上記光学手段と、固体境界レンズの第1面から放射される光を集めるための上記光学手段とが、光軸上にフォーカスする（近軸焦点）ための非球面レンズを有し、
レンズのサイズと重さを従来の顕微鏡の対物レンズのそれより小さくした請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
11. 上記固体境界レンズの第1面を通る光をフォーカスするための上記光学手段と、固体境界レンズの第1面から放射される光を集めるための上記光学手段とが、共焦点顕微鏡より成る請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
12. サンプルからプローブチップ迄の距離を制御するための上記垂直位置決め器が
a) 固体境界レンズを乗せる片持ちレバーと、
b) 片持ちレバー偏角センサと、及び
c) 片持ちレバー位置決め器と
を有し、
片持ちレバーの偏角を感知し、サンプル上のプローブの位置を調節する請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
13. 上記片持ちレバー偏角センサが更に、
a) 偏角センサ光源と、
b) 固体境界レンズの第1面を通る光をフォーカスするための光学手段の上側に位置され、偏角センサ光源からの光と固体境界レンズの第1面を通るフォーカスされる光とを結合する光学信号結合手段と、
c) 固体境界レンズの第1面の小さな区域上の反射被覆と、
c) 偏角センサ光検出器と、
を有し、偏角センサ光源からの光とサンプルを照明するための光とが結合され、SILの上面から反射され、偏角センサ光検出器によって検出され、片持ちレバーの偏角が測定される請求項12記載の走査プローブ光学顕微鏡。
14. 水平位置決め器が従来の走査プローブ顕微鏡XYZ位置決めシステムを有する

5. a) 上記固体境界レンズの第1面が半球状であり、
b) 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の無収差面上に配置され、
球面光行差が最小となり、光学的解像度が改良される
請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
6. 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた無収差面に位置され、
ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、
固体境界レンズが半球レンズであり、光学的解像度が改良される
請求項5記載の走査プローブ光学顕微鏡。
7. 上記プローブチップにおける臨界角C内の光を減少し、または略消去する少なくとも1つの空間フィルタを有し、
減衰スポットサイズを減少し、解像度を改良し、光の遠一視野寄与を減少または消去する請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
8. 上記固体境界レンズの第1面を通る光をフォーカスするための上記光学手段と、固体境界レンズの第1面から放射される光を集めるための上記光学手段が夫々、
a) 固体境界レンズの上側に位置される従来の光学顕微鏡対物レンズと、及び
b) 従来の顕微鏡対物レンズの上側に位置され、光源からの光を対物レンズに指向し、対物レンズを通る固体境界レンズからの光の一部を分離して検出及び解析装置に指向せしめるための光学ビームスプリッタと
を有する請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
9. 光学顕微鏡の対物レンズと光学ビームスプリッタ間のファイバーオプティックケーブルを有し、ビームスプリッタから対物レンズへ向かう光と、対物レンズからビームスプリッタへ向かう光とをファイバーオプティックケーブルを介して伝送し、照明源と検出解析装置をより都合良く配置し、形状に大きな融通性を与え、ファイバーオプティックケーブルを共焦点顕微鏡における空間フィルタのように機能

る請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。

15. 更に光源を有する請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
16. 上記光源がレーザーである請求項15記載の走査プローブ光学顕微鏡。
17. 上記光源がレーザーとファイバー結合手段であり、
上記レーザーが顕微鏡の他の構成部分から離れて位置し、上記レーザーが形状的に大きい請求項15記載の走査プローブ光学顕微鏡。
18. 更に光センサを有する請求項1記載の走査プローブ光学顕微鏡。
19. 上記光センサがホトダイオードを有する請求項18記載の走査プローブ光学顕微鏡。
20. 上記光センサが従来の光学顕微鏡のアイピース又はカメラシステムであり、更に、光路から固体境界レンズを一時的に除去するための手段を有し、
サンプルが従来の光学顕微鏡的方法で交互に検査される請求項18記載の走査プローブ光学顕微鏡。
21. a) 対物レンズと、
b) サンプルを照明するための光を照明源から対物レンズに指向せしめ、対物レンズから放射される光の一部を光検出装置に指向せしめるための、上記対物レンズの上側のビームスプリッタと、
c) 上面と、プローブチップを形成する下面とを有し、対物レンズからの光をプローブチップでフォーカスするための上記対物レンズの下側の固体境界レンズと、
d) サンプルから固体境界レンズ上のプローブチップまでの距離を制御するための垂直位置決め器と、
より成り、照明源からの光をサンプル上の小さなスポットに指向せしめ、サンプルの小さな区域の光学特性を定める光学顕微鏡。
22. a) 固体境界レンズの下面上のプローブチップが原子力顕微鏡のプローブのように機能する形状であり、及び
b) 更に原子力顕微鏡制御器を有し、
分離した光学手段と原子力測定装置を位置決めすることなしにサンプルから

光学情報と原子力顕微鏡の測定値とが得られる請求項21記載の光学顕微鏡。

23. 上記原子力顕微鏡制御器が更に、

a) サンプルの高さを記録するための手段と、

b) サンプルの記録された高さをベースとしてサンプルの上側に正確な間隔でプローブチップを位置決めするための手段と、

を有し、サンプルからプローブ迄の既知の間隔で近-視野光学測定値を作り、サンプルからの距離の効果を維持しながらサンプルの光学特性を定める請求項22記載の光学顕微鏡。

24. 原子力制御器が更に、

a) サンプル面上の多くのポイントにおける高さ測定値を作り、記録するための手段と、

b) 高さ測定を行なった各ポイント上から原子力顕微鏡測定値から計算された正確な距離の位置にプローブチップを再位置決めするための手段と、

を有し、サンプルの大きな区域で近-視野光学測定値を作り、サンプルからの距離の効果を、サンプルの光学特性を定める請求項22記載の光学顕微鏡。

25. 対物レンズとビームスプリッタ間のファイバーオプティックケーブルを有し

、ビームスプリッタから対物レンズへ向かう光と、対物レンズからビームスプリッタへ向かう光とをファイバーオプティックケーブルを介して伝送し、照明源と検出解析装置をより都合良く配置し、形状に大きな融通性を与え、ファイバーオプティックケーブルを共焦点顕微鏡における空間フィルタのように機能せしめ、解像度を向上せしめた請求項21記載の光学顕微鏡。

26. a) サンプル支持体と、

b) 第1面と、プローブチップを形成する第2面とを有する、屈折率の大きい材料の固体界膜レンズと、

c) 固体界膜レンズの第2面上のプローブチップにおける焦点に固体界膜レンズの第1面を介して光をフォーカスするための光学手段と、

d) サンプルから固体界膜レンズ上のプローブチップ迄の距離を制御する垂直位置決め器と、

32. 上記固体界膜レンズの第1面の一部に不透明被覆を有し、これにより臨界角 θ 以内でプローブチップに達する光が阻止され、

減衰スポットサイズを減少し、解像度を改良し、光の遠-視野寄与を減少または消去する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

33. 上記固体界膜レンズの第1面を通る光をフォーカスするための上記光学手段が固体界膜レンズの上側に位置した従来の光学顕微鏡の対物レンズを有する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

34. 上記、固体界膜レンズの第1面を通る光をフォーカスするための上記光学手段と、固体界膜レンズの第1面から放射される光を集めるための上記光学手段とが、光軸上にフォーカスする(近軸焦点)ための非球面レンズを有し、

レンズのサイズと重さを従来の顕微鏡の対物レンズのそれより小さくした請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

35. サンプルからプローブチップ迄の距離を制御するための上記垂直位置決め

器が

a) 固体界膜レンズを乗せる片持ちレバーと、

b) 片持ちレバー偏角センサと、及び

c) 片持ちレバー位置決め器と

を有し、

片持ちレバーの偏角を感知し、サンプル上のプローブの位置を調節する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

36. 上記固体界膜レンズとサンプル支持体とを互に相対的に略水平面に沿って移動せしめるための走査器が従来の走査プローブ顕微鏡のXYZ位置決めシステムを有する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

37. a) 上記サンプル支持体の一部が透明であり、及び

b) サンプルからの光を集めるための上記光学手段が更に、走査されるサンプルのための透明支持体の下側に配置された集光手段を有し、

透明サンプルがこのサンプルを通る光で検査される請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

e) 固体界膜レンズとサンプル支持体とを互に相対的に略水平面に沿って移動せしめるための走査器と、及び

f) サンプルからの光を集めるための光学手段と

より成り、透明サンプルの光学特性を定め空気中の解像限界以上の解像度を得る走査プローブ光学顕微鏡。

27. 上記固体界膜レンズの第1面を通る光を上記光学手段によってフォーカスして上記固体界膜レンズ内の幾つかの光を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に投射せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作る請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

28. a) 上記固体界膜レンズ上のプローブチップが原子力顕微鏡のプローブとしての機能を果たす形状であり、

b) 上記垂直位置決め器が更に原子力顕微鏡制御及び測定手段を有し、

原子力顕微鏡として機能する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

29. a) 上記固体界膜レンズの第1面が半球状であり、

b) 上記固体界膜レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の無収

差面上に配置され、

球状減衰が最小となり、光学的解像度が改良される

請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

30. 上記固体界膜レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた無収差面に位置され、

ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、

固体界膜レンズが超半球レンズであり、光学的解像度が改良される

請求項29記載の走査プローブ光学顕微鏡。

31. 上記プローブチップにおける臨界角 C 内の光を減少し、または略消去する、固体界膜レンズの第1面を通してフォーカスされる光を選択的に透過する空間フィルタを有し、

減衰スポットサイズを減少し、解像度を改良し、光の遠-視野寄与を減少または消去する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

38. サンプルからの光を集めるための上記光学手段が更にサンプルの上側に配置された集光手段を有し、

透明サンプルがこのサンプルを通る光で検査される請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

39. 更に光源を有する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

40. 上記光源がレーザーである請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

41. 上記光源がレーザーとファイバー結合手段であり、

上記レーザーが顕微鏡の他の構成部分から離れて位置している請求項40記載の走査プローブ光学顕微鏡。

42. 更に光センサを有する請求項26記載の走査プローブ光学顕微鏡。

43. 上記光センサがホトダイオードを有する請求項25記載の光学顕微鏡。

44. a) ベース端と、上面及び原子力顕微鏡のプローブチップを形成する下面

とを有する固体界膜レンズを取付けた先端とより成る片持ちレバーと、

b) 上記片持ちレバーのベースの端に対するサンプルの位置を制御するための位置制御メカニズムと、

c) 上記片持ちレバーの偏れ量を測定するための小変位測定メカニズムと、

d) 上記片持ちレバーの偏れ量を1つの入力とするプローブチップの垂直位置を制御するための帰還制御メカニズムと、

d) プローブチップの垂直及び水平位置データを記録するための手段と、

e) 上記固体界膜レンズの第1面を通る光を固体界膜レンズの第2面上のプローブチップにおける焦点にフォーカスして上記固体界膜レンズ内の幾つかの光を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に投射せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作る光学手段と、及び

f) 固体界膜レンズの上面から放射される光を集めるための光学手段と、より成り、滑らかな及び粗いサンプルについての原子力顕微鏡情報及び近-視野光学情報を得て、この光学データから空気中の屈折限界より良好な解像度を作るようにした走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

45. a) 上記固体界膜レンズの第1面が半球状であり、

b) 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の無収差面上に配置され、

球状減衰が最小となり、光学的解像度が改良される

請求項44記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

46. 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた共焦面に位置され、

ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、

固体境界レンズが超半球レンズであり、光学的解像度が改良される

請求項44記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

47. 1つまたはそれ以上の空間フィルタによって上記プローブチップにおける

臨界角C内の光を選択的に透過して減少または略消去し、

減衰スポットサイズを減少し、解像度を改良し、光の遠一視野寄与を減少または消去する請求項44記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ

48. 上記、固体境界レンズの第1面を通る光をフォーカスするための上記光学手段が、光軸上にフォーカスする(近軸焦点)ための非球面レンズを有し、レンズのサイズと重さを従来の顕微鏡の対物レンズのそれより小さくした請求項44記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

49. 上記片持ちレバーのベース端に対するサンプルの位置を制御するための上記位置制御メカニズムと、プローブチップの垂直及び水平位置データを記録するための手段とが走査制御及び走査記録手段を有する請求項44記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

50. a) ベース端と、上面及び原子力顕微鏡のプローブチップを形成する下面とを有する固体境界レンズを取付けた先端とより成る片持ちレバーと、

b) 上記片持ちレバーのベース端に対するサンプルの位置を制御するための位置制御メカニズムと、

c) 上記片持ちレバーの偏れ量を測定するための小変位測定メカニズムと、

d) 上記片持ちレバーの偏れ量を1つの入力とするプローブチップの垂直位

レンズのサイズと重さを従来の顕微鏡の対物レンズのそれより小さくした請求項50記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

55. 上記片持ちレバーのベース端に対するサンプルの位置を制御するための上記位置制御メカニズムと、プローブチップの垂直及び水平位置データを記録するための手段とが走査制御及び走査記録手段を有する請求項50記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

56. a) 第1面と、プローブチップを形成する第2面とを有する高屈折率材料

の固体境界レンズを、照明される近一視野面内に位置決めし、

b) 上記固体境界レンズの第1面を通る光を固体境界レンズの第2面上のプローブチップにおける焦点にフォーカスして上記固体境界レンズ内の幾つかの光を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に衝突せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作り、

プローブチップ近くのサンプルをプローブチップにおける減衰視野によって効果的に照明する滑らかな、または粗いサンプル上の小さなスポットを照明する方法。

57. 照明される面の近くに位置された固体境界レンズが固体境界レンズの幾何学的無収差面上に形成したプローブチップを有し、

球面光行差が消去され、スポットサイズが最小となる請求項56記載の方法

58. 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた無収差面に位置され、

ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、

固体境界レンズが超半球レンズであり、照明スポットのサイズが更に減少される請求項57記載の方法。

59. 臨界角度 θ_c 以下で、プローブチップに衝突する光を消去するため固体境界レンズ上にフォーカスされる光を空間的に透過し、

照明スポットのサイズを更に減少し、遠一視野光の寄与を減少または消去する工程を更に有する請求項56記載の方法。

値を制御するための締定制御メカニズムと、

d) プローブチップの垂直及び水平位置データを記録するための手段と、

e) 上記固体境界レンズの第1面を通る光を固体境界レンズの第2面上のプローブチップにおける焦点にフォーカスして上記固体境界レンズ内の幾つかの光を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に投射せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作る光学手段と、及び

f) 透明なサンプルを通してプローブチップから伝達される光を集めるための光学手段と、

より成り、滑らかな及び粗いサンプルについての原子力顕微鏡情報及び近一視野光学情報を得て、この光学データから空気中の屈折率より良好な解像度を作るようにした走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

51. a) 上記固体境界レンズの第1面が半球状であり、

b) 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の無収差面上に配置され、

球面光行差が最小となり、光学的解像度が改良される

請求項50記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

52. 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた無収差面に位置され、

ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、

固体境界レンズが超半球レンズであり、光学的解像度が改良される

請求項50記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ。

53. 1つまたはそれ以上の空間フィルタによって上記プローブチップにおける臨界角C内の光を選択的に透過して減少または略消去し、

減衰スポットサイズを減少し、解像度を改良し、光の遠一視野寄与を減少または消去する請求項50記載の走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡の組合せ

54. 上記固体境界レンズの第1面を通る光をフォーカスするための上記光学手段が、光軸上にフォーカスする(近軸焦点)ための非球面レンズを有し、

60. a) 第1面と、プローブチップを形成する第2面とを有する高屈折率材料の固体境界レンズを、照明される近一視野面内に位置決めし、

b) 上記固体境界レンズの第1面を通る光を固体境界レンズの第2面上のプローブチップにおける焦点にフォーカスして上記固体境界レンズ内の幾つかの光を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に投射せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作り、

c) 固体境界レンズの上面から放散された光を集め、

d) 集めた光の特性を測定し、

プローブチップの近くのサンプルをプローブチップにおける減衰視野によって効果的に照明し、測定及び解析のためプローブチップから効果的に集光する滑らかな、または粗いサンプル上の小さなスポットの光学特性を測定する方法。

61. 照明される面の近くに位置された固体境界レンズが、固体境界レンズの幾何学的無収差面上に形成されたプローブチップを有し、球面光行差が消去され、スポットサイズが最小となる請求項60記載の方法。

62. 上記固体境界レンズの第2面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた無収差面に位置され、

ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、

固体境界レンズが超半球レンズであり、照明スポットのサイズが更に減少される請求項61記載の方法。

63. 臨界角度 θ_c 以下で、プローブチップに衝突する光を消去するため固体境界レンズ上にフォーカスされる光を空間的に透過し、

照明スポットのサイズを更に減少し、遠一視野光の寄与を減少または消去する工程を更に有する請求項60記載の方法。

64. a) 第1面と、プローブチップを形成する第2面とを有する高屈折率材料の固体境界レンズを、照明される近一視野面内に位置決めし、

b) 上記固体境界レンズの第1面を通る光を固体境界レンズの第2面上のプローブチップにおける焦点にフォーカスして上記固体境界レンズ内の幾つかの光

を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に衝突せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作り、

- c) 固体境界レンズの上面から放散された光を集め、
- d) 集めた光を測定し、

- e) プローブが上記面を走査した後、上記工程 a) ~ d) を繰り返し、
- f) 集めたデータを解析し光学イメージに組み込み、

プローブチップの近くのサンプルをプローブチップにおける減衰視野によって効果的に照明し、測定のためプローブチップから効果的に集光し、

滑らかな及び粗いサンプルの光学イメージを空気中の屈折率より良好な解像度で得る滑らかな、または粗いサンプルの光学顕微鏡的測定方法。

65. 照明される面の近くに位置された固体境界レンズが、固体境界レンズの幾何学的無収差面上に形成されたプローブチップを有し、球面光行差が除去され、スポットサイズが最小となる請求項 6 4 記載の方法。

66. 上記固体境界レンズの第 2 面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた無収差面に位置され、

ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、

固体境界レンズが超半球レンズであり、照明スポットのサイズが更に減少される請求項 6 5 記載の方法。

67. 臨界角度 θ_c 以下で、プローブチップに衝突する光を消去するため固体境界レンズ上にフォーカスされる光を環状に減過し、

照明スポットのサイズを更に減少し、遠一視野光の寄与を減少または消去する工程を更に有する請求項 6 4 記載の方法。

68. a) 原子力顕微鏡 (AFM) のプローブとして第 1 面と、プローブチップを形成する第 2 面とを有する高屈折率材料の固体境界レンズを用いてサンプルを走査し、

b) 走査の X 及び Y 位置に夫々応じた高さデータ Z を含む原子力顕微鏡の走査情報をメモリ手段にメモリし、

c) 走査の X 及び Y 位置の夫々のための、サンプルの減衰視野内でサンプル

レンズ上にフォーカスされる光を環状に減過し、

照明スポットのサイズを更に減少し、遠一視野光の寄与を減少または消去する工程を更に有する請求項 6 8 記載の方法。

の上側から一定距離の新しい高さ値 Z' を、メモリされた走査データから計算し

- d) 新しい高さ値 Z' で、固体境界レンズの第 2 面上のプローブを AFM

走査の X 及び Y 位置に再位置決めし、

e) 上記固体境界レンズの第 1 面を通る光を固体境界レンズの第 2 面上のプローブチップにおける焦点にフォーカスして上記固体境界レンズ内の幾つかの光を臨界角より大きい角度で上記プローブチップ上に衝突せしめ、上記プローブチップに隣接して減衰視野を作り、

f) 固体境界レンズの上面から放散される光を集め、

g) 集めた光の特性を測定し、

h) 走査の X 及び Y 位置の夫々のため工程 d) ~ g) を繰り返し、

i) 集めたデータを解析し光学イメージに組み込み、

プローブチップの近くのサンプルをプローブチップにおける減衰視野によって効果的に照明し、測定のためプローブチップから効果的に集光し、

滑らかな、または粗いサンプルの光学像を空気中の屈折率より良好な解像度で得、サンプルの光学特性がプローブとサンプル間の距離の効果から定める

滑らかな、または粗いサンプルの原子力顕微鏡及び光学顕微鏡による測定結果を結合する方法。

69. 照明される面の近くに位置された固体境界レンズが固体境界レンズの幾何学的無収差面上に形成したプローブチップを有し、

球面光行差が除去され、スポットサイズが最小となる請求項 6 8 記載の方法

70. 上記固体境界レンズの第 2 面上のプローブチップが幾何学的球の赤道から r/n の距離だけ離れた無収差面に位置され、

ここで r はレンズの半径、 n はレンズ材料の屈折率であり、

固体境界レンズが超半球レンズであり、照明スポットのサイズが更に減少される請求項 6 9 記載の方法。

71. 臨界角度 θ_c 以下で、プローブチップに衝突する光を消去するため固体境界

[発明の詳細な説明]

固体境界レンズを用いた走査プローブ光学顕微鏡

技術分野

本発明は固体境界レンズを用いた走査プローブ光学顕微鏡に関するものである。

発明の背景

サンプルの多くの重要な物理的特性は光学イメージングによって定めるのが最良である。然しながら、従来の光学顕微鏡は、光の波長によって極めて小さい対象物を分解する能力に制限があり、従来の“遠一視野”光学顕微鏡は永年に亘り解像度によって制限を受けている。共焦点顕微鏡、制限された孔を有するプローブを用いた近一視野方法、共焦点トンネルリング、鋭いチップから放射される僅かな光をモニタする孔なし方法等、光学顕微鏡の解像度を越える種々の技術が用いられている。これら技術の夫々には重大な制限がある。空気中の屈折率制限より良好な解像度を有する現在の技術は光レベルが低く、プローブがこわれ易く、サンプルからの距離のような他の物理的パラメータから光学情報を定めることが困難である等の欠点を有する。

対物レンズを用いた従来の光学顕微鏡は外部光源によってサンプルを照射し、遠一視野にレンズを用いて光を集めフォーカスしている。遠一視野は、多くの光学的波長で示すサンプルとレンズ間の間隔に対応する。1877年に、アベが基本式を発表している。

$$d = \frac{\lambda}{2NA} \quad [1]$$

アベの式によれば、対物レンズを用いた従来の遠一視野光学顕微鏡は d 以下の間隔は解像できない。ここで λ は光の波長、 NA は対物レンズの開口数である。開口数は下式で示される。

$$NA = n \sin \theta \quad [2]$$

ここで n はレンズの屈折率、 θ は円錐照明の半角である。

1880年に、油浸対物レンズの開口数が 1.4 に達し、光学顕微鏡によって略 0.2 ミクロン (可視光に対して略 $\lambda/3$) 離れた 2 点を解像できた。極めて

極端な衰減（多くの場合有導）及び紫外線の使用を除くことが従来の光学顕微鏡に対して今日迄制限となっている。

共焦点顕微鏡

レーザー走査共焦点顕微鏡（LSCM）の原理が1950年にミンスキによって始めて示された。この従来既知の技術では、点光源からの光がサンプルの極めて小さい区域を照明し、ポイント検出器が小さな区域からの光を検出する。検出器の空間容積を制限することによって従来の屈折率限界より好ましい解像度でイメージが得られる。走査したテレビイメージは1回に1つのピクセルを作るのと同様の手段で、光源と検出器を同期して走査することによってサンプルのイメージは1回に1つのポイントを形成する。共焦点顕微鏡は標準の光学顕微鏡を超える多くの利益を有する。例えば、共焦点顕微鏡によれば透明なサンプルの光学セクション（即ち、深度識別）ができ、反射不透明サンプルの表面形状のイメージを作ることができる。更に共焦点顕微鏡は従来の顕微鏡の1.4倍位の水平解像度を有し、生物サンプルを用いた標準の顕微鏡で通常観察されるフォグを除去できる。

従来技術は更に、光源または検出器を同期して走査することなしにリアルタイムで完全な像を作るため非干渉性光源とイメージ検出器とを用いる共焦

点顕微鏡を含む。この全視野共焦点顕微鏡はポイント検出器の代りの空間フィルタとしてニポイ内板と呼ばれるピンホールの列を有する回転ディスクを用いる。共焦点顕微鏡の共通の特性は、サンプルのイメージ軸“スライス”の能力と、対物レンズを用いた従来の顕微鏡に比較して横方向解像度が改良されることである。

近一視野顕微鏡

1928年にシンジが提案した光学顕微鏡は遠一視野を捨て、代わりに近一視野によって光の屈折率限界を超えることができた（E. A. シンジ, “超顕微鏡区域に対する延長顕微鏡的解像のための提案方法” フィル マグ 6 (1928) P. 356-362）。近一視野はサンプルに1つの光学波長以下に接近して存在する。極めて小さい孔を用い、サンプルの近一視野内に孔を配置することによって光学顕微鏡は十分に大きい解像力を得ることができる。

を波長以下の孔またはピンホールを介して押し込む。

近一視野プローブ顕微鏡は更に制限を有する。チップとサンプル間の間隔制御に際して、ファイバプローブ顕微鏡ではファイバーがこわれ易く、チップとサンプル間の距離の制御は非常に注意して行なう必要があり、または、ダメージを防ぐため極めて滑らかなサンプルが必要である。検査すべき面を膜から成る距離、即ち略孔の直径に等しいだけ離して配置するためには、光の波長以上に平らな面であることが必要である。更に、この種近一視野顕微鏡では、不透明サンプルのためにはファイバプローブと、従来の集光手段のサンプル面の上面のスペースが制限されるようになり、その実効が困難

となる。

光子トンネル顕微鏡

光子走査トンネル顕微鏡（PSTM）として知られている走査トンネル光学顕微鏡（STOM）の操作のベースは鋭いポイントとした光透過性チップに対する内部反射光子のサンプル変調トンネルリングである（フェレルその他の米国特許第5,018,865号）。光子の源はサンプル面からの光ビームの全内面反射（TIR）によって作られた減衰視野であり、サンプル面に直角な指数関数的に減衰する波形を作る。減衰視野強度における空間変化はイメージングのベースを形成する。チップに対する全内面反射からトンネルする光子は光束を電気信号に変える好ましい検出器に案内する。

これらの顕微鏡は、臨界角より大きい角度で面に入射する平行にされた（フォーカスされない）光を用いている。これらはインデックスマッチングゲルまたは油を用いたプリズムに光学的に結合した透明サンプルを用いる必要がある。光はサンプルの大きな区域（一般に約1mm²）を照明する。傾斜ファイバーチップは減衰視野を不安定としサンプルからの幾つかの光が“リーク”し、ファイバーチップによって集光される。ファイバーに接続された光検出器は集めた光をモニタする。

この技術ではサンプルが透明でなければならず、スポットサイズが大きいための背景信号の強さにより汚れやプリズムとサンプル内に欠陥からの光の散乱によ

シンジのアイデアの多数の異なる実施が行なわれている。ポールは、使用した光の波長に比べて小さい直径の略孔を鋭い先端状とした光学的に透明なボディの頂部に形成し、ボディをプリズム状水晶の不透明層でチップを被覆することを提案した（米国特許第4,604,520号）。コーネル“タフイブルド”ガラス顕微鏡の群では直径を波長以下に下げ孔を金属被覆した。ベジグはガラス顕微鏡を光ファイバケーブルで置き代えることによってコーネルブロード顕微鏡を改良した（米国特許第5,272,330号）。光ファイバケーブルを用いることによってベジグは伝達効率（光生産）を振幅の3または4のオーダーとした。

一方ベジグは基本的問題はそのままとして効率を向上せしめた。光は標準直径の光ファイバケーブルを効果的に伝わるが、直径が成る値以下に減少すれば光が“チョークオフ”となる。光は標準直径の光ファイバケーブル内をウェーブガイド様に伝わるが、内側のコアの直径が減少すれば伝達モ

ドが減衰モードとなる。減衰モードでは光エネルギーは正しい伝達をなし得ない程になり光ファイバコアにもはや閉じ込められないようになるが、エネルギーの一部が背面反射によって金属被覆内で消費し、または分散し、光ファイバケーブルが非伝達モードとなる。距離が長いと光は減衰モードで伝送され、エネルギーの消費はより多くなる。直径1000Åの孔を有するファイバプローブは略2×10⁻⁴の効率を有し、直径250Åの孔を有するプローブは略1×10⁻⁶の効率を有する。この効率は下降し解像度をより小さくする。引張によって極端に小さい孔を作り得るが、その効率は極めて小さく、実際上孔に達する光は使用できず、サンプルを有用な像を得る程度に十分に照明できない。

ファイバプローブの改良はイスラム（米国特許第5,485,536号）やバックランド（米国特許第5,410,151号）によってなされている。光ファイバーを薄いポイントに引き、非伝達、減衰モードにおいて多くの波長の光を通すよう光を押し込む代わりに、イスラムは数波長のオーダーの長さのチップを有する円錐チップを用いている。バックランドは単一モードのファイバーの代りに多数モードのファイバーを用いプローブチップの傾斜率を制御して効率を改良した。然しながら、操作の原理は同一であり、光を不透明金属被覆に閉じ込め、光

って迷光を生じるようになる。光学特性と表面形状の混合によって極めて小さい像を作ることができるが、宣伝される解像度は従来の遠一視野光学顕微鏡程度のものである（可視光に対して200nmまたはλ/3）。このデータはチップと面間に水分が捉えられ内部反射が複雑となるか否かに依存する。用いられるチップはこわれ易く、チップとサンプル間の力を制御するため力を得難くすることはできない。

アカミネは傾斜ファイバーを感光性片持ちレバーに代えた光子トンネルプ

ローブを提案している（米国特許第5,489,774号）。レバーの下面の感光性区域は減衰視野の局部的崩壊または全内面反射（FTR）の挫折によって生じた光を集める。レバー上の鋭いチップはサンプル面の減衰視野を局部的に不安定ならしめるために用いる。片持ちレバーには感光性区域をホトダイオード電流測定回路に接続するワイヤを配線する。更に、片持ちレバーの偏角センサ16が感度の良い力帰還を形成する。

アカミネのものはファイバプローブ光子トンネル顕微鏡と同様の制限を有し、光検出器はチップの形状より大きい能動エリアを有するため電氣的ノイズに大きい感受性がある。

“全視野”光子トンネル顕微鏡は1987年にJ. M.によって提案された（グエラの米国特許第4,681,451号）。鋭いチップを有するプローブの代りに顕微鏡は（対物レンズの前面の直径によって定めた）大きな区域に亘るサンプル面に接する薄いフィルム変換器を用いる。顕微鏡は全内面反射光を用いた表面形状を測定する。環状照明は高い横方向解像度（略λ/4）を作り、減衰波の指数関数的減衰は垂直解像度を1nmとする。不幸なことに最大垂直範囲（視野深度）が僅かλ/2であり、変換器は大きな接触面積を有しているためサンプルは極めて平らである必要がある。

更に、グエラによって提案された顕微鏡は屈折率変化から高さ変化を分離することができない。高さ変化は変換器とサンプル間の分離を変え、屈折率の変化は減衰波の減衰長さを変える。両効果は同様の光学コントラストを作る。従って、高さ屈折率変化の間の混同を避けるため光学的に等方性の材料（一定の屈折率

を有する)を用いてサンプルのレプリカを時により作る必要がある。

原子力顕微鏡と走査エネルギー顕微鏡の結合

原子力顕微鏡 (AFM) と走査エネルギー顕微鏡の結合が提案されている。光学イメージングのため近視域技術を用いたとき、AFM能力によ

って作られた付加的情報によりプローブの高さ効果からサンプルの光学特性を定めることができる。一般的な走査エネルギー顕微鏡はサンプル上で光学プローブを走査する能力を持つ必要があるため、AFMの能力の合体は極めて明確である。多くの光学プローブはAFMプローブとして用いるには適しないが、提案された結合顕微鏡の多くは光のレベルが極めて低く調整は困難である。

ハンスマは、レーザー走査共焦点顕微鏡 (LSCM) と一体化した原子力顕微鏡 (AFM) を有する走査エネルギー顕微鏡と走査プローブの結合を記載している (米国特許第5, 581, 082号)。AFMプローブまたはLSCMのレーザービームを分離して走査するよりはこの発明はAFMとLSCMイメージを同時に作り位置決めするためサンプル走査器を用いる。

ハンスマのフォーカスエレメントは従来の顕微鏡の対物レンズであり、横方向光学解像度は従来のLSCMと同一である。この発明のプローブは高さ情報を作る従来のAFMのチップである。同時の光学的及び高さイメージングにはAFMプローブチップ上にLSCMレーザースポットを位置決めするため正確な位置決め作業が必要である。ハンスマの顕微鏡は第1に透明サンプルのために設計されている。不透明反射サンプルの場合には、作動距離が長い横方向解像度が低く、従って、開口数の低い対物レンズが望まれる。ハンスマは、サンプル面に接近するように配置したプローブを有するAFMから別個に離れたエレメントである、フォーカスエネルギーのための手段としてLSCMを開示している。

ハンスマの顕微鏡は、近視域走査光学顕微鏡に対比される屈折率境界より良好な解像度を得ることのできるというLSCMの限定された改良を有するものである。ハンスマは光学構成部品から分離したAFMプローブを用いているため、その設計には完全な位置決めの問題がある。

孔なし近視域光学顕微鏡がウィックラマシニングにより (米国特許第5, 60

斜と表面の汚れ (粒子、ダストや砂) により、接触区域に亘りチップとサンプル間のギャップが変化する。その結果、最近の固体境界光学顕微鏡によっては多くのサンプル面について高い横方向解像度を達成することはできない。

固体境界レンズは光学データ貯蔵システムとして既知である。コール (米国特許第5, 125, 750号) とマミン (米国特許第5, 497, 359号) は固体境界レンズを用いた光学デスクシステムを開示している。光学アセンブリは光学媒体から読み出す、または、記述するための対物レンズと、対物レンズと媒体間に配置した、記録媒体から僅か離れた面を有する固体境界レンズとを有する。データ貯蔵システム内に用いた固体境界レンズは大きな底面を有するが、これは平らな面のみに用いるのに適し、従って顕微鏡を用いる用途には適しない。SILの平らな底面は、SILとデスク面間のギャップのサイズを制御するため滑らかなデータ貯蔵媒体に接する空気を形成するが、高さ変化のためSIL上の力を制御するための力帰還ループは作られない。

発明の要約

本発明の第1の目的は、装置のこねれ易さと位置決め困難性なしに現在の近視域顕微鏡よりも高い光効率を有し、滑らかな及び粗のサンプルの光学像を空気中の屈折率境界を超える解像度で得ることができる走査プローブ光学顕微鏡を得るにある。本発明の他の目的は、デザイン上の制限なしに走査プローブ光学顕微鏡と原子力顕微鏡を結合することにある。本発明の他の目的は滑らかな及び粗のサンプルの双方に極めて小さいスポットサイズの照明を行ない、滑らかな及び粗のサンプルの双方に極めて小さい区域の光学特性を定め、空気中の屈折率境界以上の解像度で滑らかな及び粗のサンプルの双方の光学像を得る、改良された方法を得るにある。

本発明の他の目的は、干渉技術を用いて高さ変化を測定することを含む、サンプルの広い範囲の光学特性を得る多目的顕微鏡を得るにある。

本発明の他の目的は、接触面積を減少し、プローブをサンプル面に近接できるようにするためSILプローブ上に鋭いチップを用いて滑らかな及び粗の表面の双方のイメージングを達成することにある。高い横方向光学解像度が粗の面で

2, 820号) 示されている。この顕微鏡は、原子サイズのオーダーの

厳格さを有する標準のAFMチップを用いている。従来の対物レンズはAFMのチップの端部を照明する屈折率制限スポットに対し光をフォーカスする。干渉計はチップとサンプルからの散乱光をモニタする。サンプルとAFMチップの腕からの強い背景信号があるため、チップの頂部からの散乱光を検出するのが困難である。ウィックラマシニングは背景光を減少するためチップにデジザ動作を加えることを開示している。この顕微鏡においては、対物レンズとAFMの片持ちレバーのためのスペースがサンプル上に必要であるため不透明反射サンプルの配置が困難である。更に、片持ちレバーとAFMチップのベースが焦点ビームを妨げるようになる。

固体境界レンズ顕微鏡

1990年にマンスフィールドとキノによって近視域固体境界光学顕微鏡が提案された (米国特許第5, 004, 307号)。この顕微鏡は、液浸顕微鏡と同一の原理を用い、但し液体を高屈折率材料の固体レンズによって代えたものを用いてリアルタイムで操作される。この顕微鏡は、サンプル面に直接接するよう配置した半球状固体境界レンズ (SIL) を照明するため非干渉性光源を用いた広視野共焦点顕微鏡をベースとしている。アイピースまたはCCDカメラのような像検出器に像を作るため光を反転せしめる。固体レンズの屈折率 n を2とし、436nmの照明でこの顕微鏡は、100nmのラインとスペースを解像でき、エッジレスポンスで共焦点顕微鏡を超える2つの改良の要素がある。

マンスフィールドとキノの顕微鏡において用いたSILは球状面 (頂部) と球の中心に交差する平らな面 (平坦な底) を有する。平らな面は、少なくとも所望の視野の大きさ (一般に50~100 μ m) の区域に亘りサンプルに接触せしめる必要がある。高い横方向屈折率を得るためには平らな面とサンプル間のギャップを全視野に亘り波長の数分の一とする必要がある。不幸なことに、特に粗いサンプルの場合、全接触区域に亘り上記のような小さなチップ

とサンプル間のギャップを維持することは不可能である。更に、サンプルの傾

、汚れがあっても (粒子、砂、ダスト等) 得られる。更に、SILプローブの鋭いチップはプローブとサンプル間で互に傾いている場合にも対応できる。

本発明の目的はSILプローブを支持する片持ちレバーと、片持ちレバーの偏れをモニタするセンサとを用いることによってチップとサンプルを感度良く制御することにある。感度の良い力帰還ループは、高い横方向解像度と強い光信号のために必要なギャップをチップとサンプル間に維持し、鋭いチップに対するダメージを阻止する。片持ちレバーは原子力顕微鏡に対し接触、非接触、タッピングモードやリフトモードの総てのモードで走査可能である。

本発明は、小さな焦点を作る固体境界レンズ (SIL) プローブを使用して、空気中の屈折率境界より大きい高解像度を有する光学特徴を作る。SILプローブは、開口数 $NA = n \sin(\theta)$ に増加することによってスポットサイズを減少する。SILプローブの球面での屈折は角 θ を増加する。SILは高屈折率 n を有する材料で作る。実際上、高屈折率材料は光の波長を減少する。更に、SILプローブの寸法は、光学的光行差を少なくすることによってスポットサイズを小さくするように選択される。SILの無収差面に光をフォーカスすることによって球面光行差を消去し、SILプローブの光軸上にスポットをフォーカスすることによって軸を外れた光行差を消去する。

本発明のフォーカスされたスポットサイズは、入射光プロファイルを空間濾過することによって更にそのサイズを減少できる。現状濾過は収れんする光

の軸光に相対的な線光内で光学パワーを増加せしめることによってスポットサイズが減少する。

本発明は多い光量の強い光信号を作り、SILプローブが他の近視域プローブよりも多い光量を有するとき高速走査を達成する。SILプローブの光量は一般のファイバープローブよりも振幅のオーダーが大きい。約100nmのスポットサイズを作るSILプローブは (非反射被覆を用いることによって増加できる) 光学パワーの約半分 (50%) を伝達する。比較としては、10nmの孔を有する金属被覆ファイバープローブは約10⁻⁴ (0.001%) 伝達するのみである。

本発明によれば、異なるSILプローブチッププロファイルの使用によりサンプルの広い範囲の光学的特徴に適用できる。鋭いチップはサンプルをプローブチップで走査することによって高解像度の像を得るため用いる。大きな曲率の広いチップは干渉技術を用いてサンプル高さ変化を定める。

本発明の他の目的は、光のコントラストと高さデータを分離する方法を得るにある。“リフト”モード（米国特許第5,308,974号及び第5,418,363号）として知られる原子力顕微鏡の操作モードでは一般に高さデータを記録する第1モードと、チップとサンプル間の一定のギャップと第2のコントラストメカニズムからの記録情報による走査を繰り返す第2モードを実行する。

本発明の他の目的は、少くとも光の10波長に対応する、顕微鏡技術の固有の制限ではなく走査器のZ範囲でのみ制限された最大垂直範囲を作ることにある。

本発明の他の目的は、不透明及び透明サンプルに適合する反射モードと伝達モードの双方で操作するにある。

本発明の他の目的は、SILプローブとサンプル間の接触面積ではなく走査器の範囲によって制限された大きな視野を作り、大きなサンプルのためのチップ走査をなし得ることである。

本発明の他の目的は、改良された光のコントラストと解像度を変形するためSILプローブ底面上に金属または絶縁体の被覆を作ることにある。

他の適用

本発明の目的は、多くの用途に有用な光学顕微鏡及びその製造方法を得るにある。標準的光学的検査、計測及び欠陥検知に加えて、本発明は、例えばエリブソメート法や光プロファイル反射率法（ファントソの他の米国特許第5,181,080号）を用いて、高い横方向解像度で薄フィルム厚を測定するような、より精密な測定を行うにある。従来の光学顕微鏡で既知の多くのコントラストメカニズムをけい光、偏光、位相、干渉及び暗視野を含むSILプローブに適用できる。SILプローブ10は更に、赤外光及びFTIR（赤外光フーリエ変換）、可視光、変調、及びローマン拡散を含む高い空間解像度分光に適用できる。SILプローブの小さなスポットは、レーザー、ホトダイオード及び他の光学的材料のよ

物理的構成

第1A図は、片持ちレバー14に設けた鋭いチップと、片持ちレバー偏角センサ16とを有するSILプローブ10を示す。このプローブは球面と、鋭いチップを有する円錐面または角錐面を有する。

円錐状の入射周縁光12はSILのチップ近くに集まる。可換性片持ちレバー14の遊端はSILプローブを支持し、他端は基体18に取付ける。この片持ちレバー14はサンプル面近くにプローブを正確に位置決めするため

に機能する。XY位置の開数となるデータを発生するため、サンプルを支持するXYZ走査器22をSILプローブ10に相対的に移動する。

固体界長レンズ（SIL）プローブ

SILプローブ10の好ましい実施例は最少の光行差で入射光をフォーカスするための半球面を有する。

この半球の直径は一般に10μm〜10mmの範囲である。解像度は球面の精度によって制限される。完全な球形に比べての誤差によってSILプローブ内の波頭が歪み、スポットサイズが増加する。球面の球形度（完全な球からの二乗平均（rms）偏差として定められる）を波長の分数の小さな値としなければならない。更に、光の分散を最少とするため表面の質（粗さ）を制御しなければならない。更に、伝達効率を上げるため耐反射（AR）被覆をSILプローブに設ける必要がある。

周縁光12の角度は光学解像度の限界を定める。この周縁光12は、最大入射角の円錐光の縁における光線として定められる。SILプローブ10に入る円錐状の光を作るため従来の顕微鏡対物レンズ30で入射光をフォーカスする。球面における屈折は周縁光12の角度を増加し、従って、開口数を増大する。

SILプローブ10は、円錐または3面またはそれ以上の面を有するファセット加工の鋭いチップを有し、周縁光12の光路を阻げることがない。円錐チップを有するSILプローブ10のための周縁光12の角度は円錐面の最大頂角を定める。

スポットサイズを最少ならしめるため円錐の高さは r/n とする。ここで、 r

うな装置でOBIC（光誘導電流）測定するために重要である。同様にしてSILプローブは、表面の写真石版パターン及び選択光活性化のために用い得る。材料の光特性の一般的なことは例えばパーコワイスその他の“マイクロエレクトロニクス製造における光学特性” J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., vol. 99, No. 605, 1994, pp. 605-639に記載されている。

図面の簡単な説明

第1A図は、周縁光と、サンプルと、走査器及び偏角センサと共に片持ちレバー上の鋭いチップを有する固体界長レンズ（SIL）プローブを示す側面図である。

第1B図は、SIL空気インターフェースにおける臨界光と、周縁光と、

伝達光を示す光線図である。

第2図は、偏角センサと基体と共に固体界長レンズと片持ちレバーを示す平面図である。

第3A図は、顕微鏡と一体の検出器と、ビームスプリッタとレーザーと共に示す走査プローブ顕微鏡の光学トレーンの説明図である。

第3B図は、顕微鏡と一体のカメラと、ビームスプリッタと、ランプと共に示す走査プローブ顕微鏡光学のトレーンの説明図である。

第4図は、レーザー、ビームスプリッタ及び検出器から光学顕微鏡に向かうファイバーと共に示す走査プローブ顕微鏡光学トレーンの説明図である。

第5図は、片持ち支持した固体界長レンズの力帰還ループの説明図である。

第6A図は、固体界長レンズ顕微鏡のチップ走査バージョンを示す説明図である。

第6B図は、伝達光のための集光レンズと共に示す固体界長レンズの説明図である。

第7図は、底面上の（金属または電気絶縁性）薄フィルムと共に示すSILプローブの説明図である。

好ましい実施例の説明

は球の半径、 n はSILプローブ材料の屈折率である。従って円錐面の頂角は下記で示される。

$$\theta = 2 \tan^{-1}(n)$$

好ましい実施例におけるSILのチップの曲率半径は一般にフォーカスされたビームのスポットサイズより小さく、原子力顕微鏡（原子サイズ以下）に用いられるプローブのように鋭い。光学イメージングのため、SILプローブ10のチップをサンプル面に接触せしめるか、または僅か離す。

SILプローブの材料としては高屈折率で波長の広い範囲、特に短い波長での吸収の低いものが好ましい。例えば、屈折率が2.17で短波長カットオフが380nmである立方晶シリコンを含む。高屈折率ガラス、例えば屈折率が1.805でカットオフ波長が370nmであるSF6を用いる。また、屈折率が3.5でカットオフ波長が550nmのガリウム燐化物も用い得る。

硬度及び研磨性等の機械的特性も重要である。従来の研削及び研磨技術によれば、モ一単位で約7の硬度を有する材料から直径約0.5mm以下の完全な球に近いものを作ることができる。他の試みはウェハー上に微小のSILプローブを作ることにある。例えば、パッチプロセス技術によれば、反応イオンエッチングによってホトレジストのリフローによってウェハー面上に球形レンズの列を作ることができる。球形面形成後、高精度ファセット加工によって円錐、角錐、その他の形の鋭いチップを作ることができる。

好ましい実施例におけるSILプローブ10は、半球状上面と球の赤道下における無収差面84に形成される鋭いチップとを有する超半球形状のものであるが、他の実施例も考えられる。例えば、レーザーダイオード38からの非点ビームのフォーカスを最適ならしめるため上面を非球面とする。レンズに入る光を透過または阻止するため上面には光学フィルクを設けることができる。このようにすればパワーを減衰しながら入射ビームの放射パワーを制御することができる。フォーカスは、例えば球の赤道のような他の無収差面84でなし得る。

本発明はAFMプローブとして操作できる十分な鋭さのプローブのチップ

を使用して小さなスポットに光をフォーカスする共通の特徴を有する種々の形状のSILプロープ10を含む。

片持ちレバー

好ましい実施例においては、片持ちレバー14の一端を基体18に固定し、SILプロープ10を支持せしめる。片持ちレバーは高い共振周波数を有する強い弾性のものとし、その表面を高走査速度に追従せしめる。然しながらその弾性係数はサンプルにダメージを与えないよう十分に低くする必要がある。片持ちレバー14はステンレススチールのような金属、またはシリコンやシリコンニトライドのような電気絶縁性の材料で作る。その長さ、幅、厚さはSILプロープの直径及び所望の弾性係数と共振周波数によって定める。片持ちレバー14は、従来既知の基板、Vフレーム、バランスビーム等の形となし得る。

走査器

好ましい実施例においては、走査器はSILプロープ10と相対的にXYZ方向にサンプル20を移動する。走査器は多数の電極パターンを有する圧電管であって、50ボルトの電圧を加えることによってXYZ方向に移動する。サンプル20は透明または反射性としその厚さとサイズ（直径）は片持ちレバー-基体ホルダ28の形状のみによって制限される。

走査器は、圧電スタックによって駆動される可換ステージであって走査の周回制御を行なうようセンサ（容量性、LVDT等）を有する。このような走査器は例えばドイツ国のフィジックインストルメントから得られる。第1B図はSILプロープ10のチップ近くのインターフェース（界面）における光を示す。円錐形の光は高屈折率SILプロープ10と空気またはサンプル20間のインターフェース近くにフォーカスされる。入射円錐光は、光軸に沿った軸光と、臨界光24と、最大入射角における周縁光12と

を含む。臨界角以下の角度の入射光と、 θ_c はインターフェースで反射し、屈折し、反射伝達光26を作る。臨界角以上の角度の入射光は全体として内部反射し、反射光と減衰光を作る。焦点深度は下式で示される。

$$2\Delta z \sim \lambda / (4n \sin^2(\theta/2)) \quad (3)$$

ンプル走査器はSILプロープ10と片持ちレバー-基体ホルダ28とを支持する。走査プローブ顕微鏡（SPM）制御器46は、XYZ走査運動を作り、片持ちレバー-偏角センサ16からの信号を受けてサンプルの高さ（Z）を制御し、光検出器42からの光信号48を記録する。

レーザー源38は、好ましい走査速度を得るため十分なパワーと好ましい短波長を有する連続した、またはパルス状でノイズ強度が低く、ポイント安定度が良好なものとする。高品質光手段36が選択された焦点レンズ30のために最適な直径を有する平行ビームを作る。平行ビーム内のマスクにより環状照明を作るため強度プロファイルを変更できる。平行ビームの波頭エラーは、スポットサイズを出来るだけ小さくするため最少としなければならない。立方体または薄片状のビームスプリッタ34はレーザービームを焦点レンズ30に反射する。ビームスプリッタ34は、パワー50、50を単純に分割し、分極し、または2分（波長に依存）する。反射光はビームスプリッタを介して光検出器42に返すことができる。

迷光、背景光及び焦点面から外れる光を減少せしめるため光検出器42の前面に制限孔を設けることができる。低光レベル検出器（光子係数）が幾つ

かの用途のために必要であり、焦点レンズが検出器能動エリア上に光をフォーカスする。フィルタ32（a、b、c）をけい光、光ルミネセンス、偏光、強度プロファイル、位相制御等のため加え、他の光コントラスト機構を実現することができる。例えば、信号と参照波間の相対位相を極端に感度良く測定できる干渉計を作るため四分の一波長板、ウオラストンプリズム及び偏光ビームスプリッタを結合することができる（例えば米国特許第5,602,820号参照）。

直立顕微鏡は好ましくは空気中における長い作動距離及び高開口数を有する顕微鏡対物レンズ30を有する。この対物レンズ30は最少の球面光行差でフォーカスできる。このレンズの材料は短波長で高い伝達速度を有するものが好ましい。補正カラーをカバーガラスを介してイメージングするため含めることができる。他の選択としては、従来の顕微鏡対物レンズ30の代わりに光軸上にフォーカスするため（近軸焦点）に最適な単一のレンズを用いることができる。回折制限近

立方晶形ジルコニウムのためのSILプロープ10の内側の近-視野スポットにおける焦点深度は略 $\lambda/2.5$ である。拡散光の遠-視野の焦点深度は略 2λ である。

減衰光の振幅はインターフェースからの距離の指数関数で減少する。減衰光の $1/e$ 減衰長さは下式で示される。

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi(\sin^2\theta - n_{21}^2)} \quad (4)$$

ここで波長 λ 、 n_1 及び $n_{21} = n_2/n_1 = n_{211}/n_{212}$ 、 θ は入射角である。周縁光12の減衰長さは略 $\lambda/10$ である。従って、フォーカスされた入射ビームは近-視野減衰光と遠-視野拡散光を作る。

第2図は、偏角センサ16と偏角センサ電極17とを一体に有する片持ちレバー14の端近くに取り付けたSILプロープ10を示す。片持ちレバー14はその取り扱いを容易ならしめるため片持ちレバー-基体18を有する。片持ちレバー-基体18は一般に標準AFMチップのための基体と同一のサイズである。SILプロープ10は、片持ちレバー14の遠端近くの僅かに小さい直径の孔に手動で密着して取り付けられることができる。また、SILプロープ10と片持ちレバー14は、超組立技術を用いて単体として作ることができ、この場合にはアセンブリが不要となりコストを低くできる。

片持ちレバー-偏角センサは既知である。一般的な偏角センサとしては、ス

トレングージ、水晶レジスタストレンゲージ素子、PZT薄膜フィルム、光学干渉計及び光学レバーがある。片持ちレバーとSILには、光学偏向センサーの働きを最適とするため反射被覆を設けることができる。固体界膜レンズ顕微鏡の好ましい実施例においては片持ちレバーの偏角を検出するため光学レバーを用いているが、本発明においては干渉検出、ストレンゲージ検出及び圧電効果検出等の従来既知の他の片持ちレバー-偏角センサを用いることができる。

光学トレン

第3A図は、走査プローブ顕微鏡の光学トレンの実施例を示す。顕微鏡は従来の直立顕微鏡に取り付けた光検出器42と、レーザー源38とを有する。サ

軸焦点を作るためには高開口数非球面レンズが好ましい。更に他の選択としては、従来の顕微鏡対物レンズ30の代りに、フォーカスのためのレンズよりむしろミラーを用いた反射対物レンズ（例えばスワーステルド対物レンズ）を用いることができる。反射対物レンズを用いることによる利点は、高開口数、長い作動距離、短波長においても少ない吸収ロス及び色彩光行差が零であることである。直立顕微鏡はサンプル20を直視するため及び光学素子を揃えるためのアイピース44を有する。

片持ちレバー-基体ホルダ28はSILプロープ10を支持し、例えば細かいピッチのねじを駆動するステッピングモータを用いることによってサンプル面近くにプローブを相対位相決めせしめる。片持ちレバー-基体ホルダ28によって片持ちレバー-基体18を支持するため、押圧スプリング、磁気素子、真空、接着剤等を用いることができる。XYZ走査器がサンプル20を走査し、SPM制御器46がチップとサンプル間のギャップを制御しながらラスタ走査をX、Y方向で行なう。SPM制御器46は更に光検出器18をモニ

タし記録する。

顕微鏡の光学トレンは、信号波と参照波とを有する干渉計を含む。信号波はSILプロープ10とサンプル20の相互干渉を測定し、参照波は光学トレンの残りを測定する。干渉計は信号波と参照波の振幅と相対位相をモニターする。干渉計を操作するために必要な光学要素は、四分の一波長板と、ウオラストンプリズムと、ビームスプリッタと、種々の標準偏光制御要素である。

第3B図は、広視野イメージングのためのSILプロープを用いた他の実施例を示す。この実施例ではレーザーの代りにランプ102を用い、直立顕微鏡上の光検出器の代りにカメラ108を用いる。プロセッサ110がカメラ信号をモニタし、広視野イメージプロセス機能を作成せしめる。SPM制御器46は処理されたイメージのためのディスプレイを含み、視野を選択しチップとサンプル間のギャップを制御するためXYZ位相決めステージ112を制御する。

好ましい実施例は、ラスタパターン内で走査し、ピクセル毎のデータを補正することによってイメージを作る走査プローブ顕微鏡である。この例においては、

SILプローブは鋭いチップを有し、単一のピクセルを照明するため小さなスポットに光をフォーカスする。

他の実施例は、サンプルの領域を見るため、及びピクセルの任意の列を照明するため広いチップ（大きい曲率半径の）を有するSILプローブを用いた広視野イメージング顕微鏡である。このチップとサンプルの接触面積は視野を制限し、接触半径は下記のように示される。

$$r_c^2 = 2Rr$$

ここで r_c は接触半径、 R はチップ半径、 S はチップとサンプル間の最大ギャップである。例えば接触直径が10ミクロンのものに対してはチップと

サンプル間の最大ギャップが50nmの場合250ミクロンのチップ半径を必要とする。従って、広視野イメージング顕微鏡は平らで滑らかなサンプルに最適である。

他の実施例におけるランプ102は、水銀アークまたはタンガステンハロゲンランプ等の収れんしない照明源である。ケラー照明器104は視野全体を均一に照明し、視野サイズを制御するための視野ダイヤフラムと、焦点レンズの照明を制御するための開口ダイヤフラムとを有する。カラーフィルタ32bは照明の波長帯を選択できる。球状の（上方）SIL面からの背景光を減少し、イメージコントラストを改良するため従来の直立顕微鏡を共焦点顕微鏡に代えることができる。更に、SILプローブをAR被覆し反射光を減少できる。

第4図は、近視野走査プローブ顕微鏡の光学トレーンの他の実施例を示す。この例においては、空間抑制を消去するためファイバークップラー56を有する直立顕微鏡にレーザー光学手段36とセンサ光学手段40を接続する。ファイバークップラー56は、1~100ミクロンの直径のコアを有する一般に単一モードのオプティカルファイバー54を用いたファイバークリメータ/カップラーを有する。

ファイバークップラー56は臨界的に時により注意深い調整が必要である。角度研磨ファイバークップラー56を用いることによって光検出器42における大

粗いX-Yステージ78と、Zステージ76を支持し、SILプローブ10をサンプル面に粗接近せしめる。サンプル20は固定されているので、マウント80は直径12"のシリコンウェハーのような大きなサンプル20を支持できる。更に、マウント80は大きい範囲のサンプル厚さ（0.001"~10"）に調節できる。

第6B図は、透明サンプルのための走査プローブ顕微鏡のチップ走査バージョンを示す。集光レンズ86はサンプルに加えられた光を集め光検出器42に向ける。

第7図は、円錐または角錐（底）面上に金属または電気絶縁材料の層を有するSILプローブ10のバージョンを示す。傾斜光ガイドプローブのためには金属被覆は欠点となるが、SILプローブ底面のためには利益となる。例えば、フィルム内の粒子が光を高効率に発散でき、弱い信号を検出できるようになる。

屈折率と吸収のような光学特性は層材料の選択を定める。例えば、Au、Ag、Al等は光を散乱する断面を定める粒子サイズを有し、厚さは部分的に透明から不透明に光学密度を制御する。0.01 λ ~10 λ の範囲の直径を有するチップ近くの不透明被覆82内には孔やピンホールが生ずる可能性がある。例えば、GaP、MgF、SF6、CaF等の電気絶縁性被覆82はSILプローブ材料と異なり屈折率と透明度（吸収）を有する。

SILプローブ面に亘り被覆82の厚さは波長より大きいか小さく変化できる。多層の被覆82も有用である。最後に、SILプローブ面に対する薄フィルムの接着はサンプル20の走査の間フィルムが剥がれないように十分に強くなる必要がある。

本発明の操作

第1A図と第1B図においてフォーカスされたレーザー光はSILプローブ10上に入射する。レーザー源38は一般に単一波長として操作されるが、少ない吸収の材料のSILプローブの範囲を越える波長のバンドを用いることが可能である。理想的な入射光は光行差に無関係に収れんする球状波頭を有する。SILプローブ10の球面での屈折により光は更にフォーカスされ開口数（NA）が増

きなノイズを作る背面反射を最少にすることが必要である。

第5図は、SILプローブ10のための力帰還ループを示す。好ましい実施例においては、光学レバー偏角センサがチップ-サンプル力をモニタし、帰還ループ68に対するアナログまたはデジタルの入力を作る。光検出器42は入力を作る。A-D（アナログ-デジタル）コンバータ64はデジタルプロセッサ68のための信号をサンプルできるか、または、低光レベル光子計数（TTL）検出器からのデジタル入力を得る。

光学レバー偏角センサは片持ちレバー14上に入射し片持ちレバー14上

の反射面から反射される光ビームを有する。調整ミラー60は反射されたビームを位置-感知光検出器62に加える。従来の原子力顕微鏡には存在しない付加的抑制は、光学レバーセンサが顕微鏡対物レンズ30の作動距離を調節しなければならないことである。最も好ましい手段は、光軸に略平行に光学レバーレーザーを対物レンズ30に加えることである。次いで、反射ビームを対物レンズを介してミラー60と位置-感知光検出器62に加える。この場合、顕微鏡対物レンズ30の作動距離を短く調節できる。SIL光検出器42からの光学レバーレーザー58の迷光を遮断するためフィルタが必要であり、または、光学レバーレーザービーム58の波長が顕微鏡に用いる他の光源の波長より大きく異なる。

好ましい実施例においては、デジタル帰還ループは、帰還を完成するため偏角センサ16からの入力A-D64と、帰還のための高速デジタルプロセッサ68と、Z軸アクチュエータに対する出力D-A66とを用いる。

走査制御器70は、デジタル電子手段68からのラスタ-走査を制御するためのパラメータを受け取り、D-A66を介してXYZ走査器に送られる直線走査パターンを作る。コンピュータ72が帰還ループとラスタ走査を制御し、イメージデータを記録し表示する。

第6A図は、走査プローブ顕微鏡のチップ走査バージョンを示す。XYZ走査器22は片持ちレバーSILプローブ10を支持し、プローブをサンプル20に相対的に移動する。XYZ走査器20は更に中間焦点レンズを支持し、走査しながら、入射ビームの軸をSILプローブ10の軸上に維持する。マウント80が

加する。円錐照明が、アツベ制限によって与えられるスポットを有するSILプローブ10のチップ近くのスポットに収れんする。

$$d \sim \lambda / (2n_{\text{sil}} \sin \Theta_s) \quad (5)$$

球面における屈折率が周縁光12の角度と θ_M を増加し、高屈折率材料が波長を $\lambda/2n_{\text{sil}}$ に短縮するため、SILプローブ10がスポットサイズを減少する。従って、短い波長で透明となる λ/n_{sil} が小さい最大可能屈折率を有する材料を選択することによってスポットサイズを減少できる。

SILプローブ10の横方向光学解像度は、減衰波dpの減衰長さに応じたチップとサンプル間のギャップのサイズに依存する。

近視野ケース：チップとサンプル間のギャップ $< dp$

チップとサンプル間のギャップがdp以下の場合には、SILプローブ内のスポットサイズが横方向光学解像度を定める。SILプローブ材料内では円錐照明全体がフォーカスされる。TIR光がチップから小さな距離（ $dp \sim \lambda/10$ ）で減衰波を作る。サンプル20が減衰波と反応し動揺し、入射光の強度、偏光、波長、位相等の特性を変える。

選択された波長において透明なサンプルのための他の実施例においては、サンプルの層を介してフォーカスするようにSILプローブをサンプル面の下側とすることが可能である。SILプローブのチップと焦点面間のサンプル層により光行差を補正するためSILの上面は球面または非球面に選択することができる。更に、円錐照明の収れんを調節するためSILプローブのチップとサンプルの接触面積を増大する必要がある。チップとサンプル間のギャップは、サンプルに対する伝達光の効率をあげるため照明の全面積に亘りdpより小さくする必要がある。SILプローブの屈折率は、サンプルの屈折率と等しいか異ならしめることができ、SILプローブよりもサンプルの屈折率が横方向解像度を定める。透明なサンプル内に光をフォーカスすることに加えて、例えばデータ記憶ディスク上の屈折サンプル面に透明な層を

介してフォーカスせしめることが可能である。

遠一視野ケース：チップとサンプル間のギャップ> d p

チップとサンプル間のギャップが d p より大きいとき、S I L プローブ 10 の外側の遠一視野スポットサイズが横方向解像度を定める。伝達光が円錐に取れし、周縁光 12 が屈折臨界光 24 となる (第 1 B 図)。臨界光 24 の角度は下式を満足する。

$$\sin \theta_c = 1/n_{s11} \quad (6)$$

従って、S I L プローブ 10 の外側のスポットサイズは下記のファクターによって増加する。

$$n_{s11}^2 \sin \theta_c \quad (7)$$

これらの光はサンプル 20 と反応し、横方向解像度が比較的小さい遠一視野イメージを作る。

環状照明

レーザー光の中心近くの光を遮断する空間フィルタ 32 (ドナツトマスク) により伝達光 26 (臨界角以下の入射角の光) を除去できる。この結果、遠一視野ケースが除去され、1.3 ~ 1.6 の付加的ファクタによってスポットサイズを改良できる (グラソ他による米国特許第 4,681,451 号参照)。レンズの全 NA は光検出器 42 に光を戻すために有用である。このことを考慮して立方晶形シリコンウム S I L プローブの究極の解像度が $\lambda/6$ 、またはカットオフ波長における 60 nm よりも理論的に良好となる。

鋭いチップ

サンプル面は減衰波の減衰長さ d p よりも大きい粗さである。更に、サンプル面は (例えばダスト、砂、粒子等により) 汚れている。従って多くの場合、チップとサンプル間のギャップを、従来の S I L プローブに望まれる大きな接触面積 (略直径 $100 \mu\text{m}$) に亘り d p 以下に維持することは不可能である。鋭いチップは、接触面積が小さく、従って S I L プローブ 10 を、汚れがある場合でも粗いサンプル面に対し、チップとサンプル間のギャップが d p 以下となるようにサンプル面に十分に接近できるようになる。チップの半径は面の粗さ及び望まれる追従高さの程度に応じて光学スポットサイズよりも大きい、または小さくする

サンプル 20 間の力に応じて偏向 (傾み) をせしめる。

片持ちレバー 14 上のセンサがこの傾みを検知し、帰還ループ内でこのチップ-サンプル間の力を制御する。上記センサは既知であるが一般的にはストレンゲージ、P Z T 薄フィルム、光学干渉計、光学レバー、トンネルチップ、誘導及び容量性センサが用いられる。このセンサによれば、チップとサンプル間のギャップをチップの近一視野内に維持し、チップやサンプル 20 に対するダメージを阻止するためチップとサンプル間の力を正確に制御できる。

片持ちレバー力帰還に代えて、またはこれに加えて、チップとサンプル間のギャップを近一視野光信号 48 によって制御できる。遠一視野伝達光は大

きな焦点深度 (立方晶形シリコンウムでは $2 \Delta Z \sim 2 \lambda$) を有するが、環状照明を用いて伝達光 26 を省略できる。従って、光学的等方性サンプル 20 のためには近一視野信号強さでチップとサンプル間のギャップを測定する。

片持ちレバー 14 は総ての A F M モード、即ち、S I L プローブ 10 のチップがその走査の間サンプル面に接する接触モード、表面に接することなくチップとサンプル間のギャップを d p に近づける非接触モード (一定ギャップモード)、片持ちレバー 14 がその共振周波数で振動し、各サイクル (振動の振幅は d p より大きい、または小さい) の転換点またはその近くでサンプル面に接するタッピングモード及びチップが、始めサンプル面をたどって高さデータを記録し、次いである高さをオフセットした貯蔵データを用いて走査を行なうリフトモードで操作できる。接触モード片持ちレバーは一般に小さなスプリング定数と、低い共振周波数とを有する。タッピングモード片持ちレバーは、一般に大きいスプリング定数と、高い共振周波数とを有する。リフトモード片持ちレバーは上記接触モードとタッピングモード片持ちレバーの両方を用い得る。

リフトモードでは高さデータと光学データを分離する手段を設ける。初めの走査で A F M モードにおける高さを記録し、第 2 の走査では貯蔵した高さデータを用いて表面を戻す。高さのデータを加えることなくチップとサンプル間のギャップを d p とし、イメージ光特性を最良ならしめるため S I L は上昇または下降できる。リフトモードでは、傾斜または湾曲等のサンプル面の全体的特徴に追従す

光行差

レンズに基因する、特に、顕微鏡対物レンズ 30 と球状 S I L プローブ面からの光学的光行差はスポットサイズを増加し、横方向解像度を減少せしめる。半球面の球面度 (完全な球からの r m s 偏差の測定値) を波長の分数である小さな値とする必要がある。球面光行差を少なくするため入射光を従来既知の無収差面 84 にフォーカスする。球形レンズに対してはこのような面は 2 つある。その 1 つは赤道を通る面であり、他の 1 つは赤道から r/n の距離離れた面である。ここで r は半径、n は球における屈折率である。顕微鏡対物レンズ 30 によって光を赤道から n r だけ離れた場所にフォーカスすることによって (第 7 図)、球面光行差が修正された S I L プローブ 10 の頂部にスポットが作られる。球面光行差に加えて、他の単一色光行差、コマ収差、非点収差、視野湾曲及び歪みがある。このような軸を外れた光行差は、円錐頂部と球面軸間の分離を許容値内に確実に維持することによって少なくできる。

レイリー四分の一波基準によれば光の光路差が $\lambda/4$ 以下のとき屈折境界

を生じる。この条件から球面光行差の許容値を計算したところ、S I L プローブ 10 の厚さの許容値が数ミクロンのオーダーであることが判明した。従って、円錐の高さ及び S I L プローブ 10 の全体高さ (円錐の頂部から球面頂部迄の距離) の許容値に確実に合致するための高精度研磨工具を必要とする。

光学的効率

S I L プローブ 10 の光学的効率は、プローブが制限された孔と光吸収フィルムの使用を避けるため極めて高い。S I L プローブ材料による吸収と、上面での反射と拡散によって光のロスを生ずる。然しながら、滑らかな仕上げ表面を作る非反射被覆、高品質研磨及び材料を操作波長における吸収が最少のものに選択することによりこれらのロスを最少となし得る。従って、S I L プローブ 10 に入る光の 50 % 以上がフォーカス点に達し、光信号を作る。

片持ちレバー

片持ちレバー 14 は S I L プローブ 10 を支持し、S I L プローブのチップと

るチップを有するが、このチップは微細な特徴には追従できない。

既知の他の A F M モードとしては、チップとサンプル間のギャップが、プローブが定められた高さの面を走査したとき (プローブが表面に当たって) 変化する一定高さモード (偏向モード) がある。更に、位相イメージング、走査容量顕微鏡 (S C M)、磁力顕微鏡 (M F M)、電気力顕微鏡 (E F M)、ナノインデンテーション、及び流体や真空中のバイオロジカルサンプルの

高温及び低温におけるイメージングがある。

更に、S I L プローブ 10 は、サンプル面上を飛び越しながら従来の原子力顕微鏡で可能な速さより極めて高速で走査できる。この場合には力帰還は表面の詳細はたどらず、チップとサンプル間のギャップは変化する。光信号データ速度制限が片持ちレバー 14 の機械的応答時間より極めて高いので高速走査は可能となる。片持ちレバーの共振周波数は一般に 1 MHz 以下であるが、光の変調は少なくとも 1 GHz となし得る。

片持ちレバー 14 のスプリング定数と S I L プローブ 10 の質量は可能な最大機械的共振周波数を得るように選ぶ。従って、S I L プローブのチップは高走査速度においてもサンプル面をたどることができる。片持ちレバー 14 は S I L プローブ 10 の姿勢を制御し、維持し、その光軸を顕微鏡の残りの部分に合致せしめる。サンプル走査器に取り付けたステージ 78 は片持ちレバー基体 18 を支持し、S I L プローブ 10 をサンプル面に粗接近せしめる。

従来の光学顕微鏡

走査プローブ顕微鏡は従来の光学顕微鏡をベースとしている。レーザー源 38 からの光は高品質平行光学手段 36 に入り、平行度、光の直径及び光のプロファイルが制御される。平行にされたレーザー光はフィルタ 32 の任意の点を通り、強度、偏光、波長、位相等のパラメータが制御される。ビームスプリッタがレーザー光を焦点レンズ、一般に顕微鏡対物レンズ 30 に送る。S I L プローブ 10 が次いで光をフォーカスし、チップの近くに小さなスポットを作る。サンプルから帰った光はビームスプリッタ迄の入射光の光路を戻り、次いで光検出器 42 に入る。

走査プローブ顕微鏡（SPM）解像器46は入力として光信号48を受け取り、光イメージを作る。光強度モニタ検出器42はピクセル毎のイメージを作る。SPM解像器46は更に駆動電圧50と52を作りサンプル20

をX及びY方向に走査し、片持ちレバー偏角センサ16からの入力に応じてサンプル高さ（Z）を制御する。

広い視野イメージングを作る他の実施例においては、非平行光源（ランプ102）からの光がケーラー照明器104に入り、サンプルの照明域と対物孔の照明を制御する。光はフィルタ32を任意の点で通り、強度、光プロファイル、偏光、波長等のパラメータが制御される。ビームスプリッタ34が光を焦点レンズ例えば顕微鏡対物レンズ30に送る。次いでSILプローブ10が光をフォーカスし、チップの近くに小さなスポットを作る。サンプルから戻った光はビームスプリッタ迄の入射光路をたどり、カメラオプティクス106及びカメラ108に達する。

プロセッサ110が、サンプルの光プロファイルの特徴づける広視野イメージデータをモニタし、記録する。更に、プロセッサは一連のイメージを集め、大きな視野を得るためモザイクを作る。更にSILプローブ面から反射した光とサンプルから反射した光の干渉を処理することによってコーヒンその他の米国特許第5,204,734号、第5,133,601号と同様に付加的なサンプル特性を求めることができる。XYZ位置決めステージ112がSILの下側の関連区域を位置決めし、チップとサンプル間のギャップのサイズを制御する。

例

SILプローブを直径1mmの立方晶形ジルコニウム球から作り、球形度の許容値を125nm（5マイクロインチ、グレード5）とし、屈折率nを2.2とした。円錐形チップを半角65度、接触面積2ミクロンのSILプローブ上で研磨した。SILプローブを片持ちレバーに取り付け、テストサンプルに接触せしめた。テストサンプルは好ましい基体上に配置し蒸着用マスクとして用いた六角形の単一層に圧縮したラテックス球より成るラテックス突出パターンであった。特に、直径0.45ミクロンのラテックス球のA

し、サンプル20またはセンサの垂直運動を制御する。デジタル電子回路68によって走査の間、圧電走査器を上下し、サンプル20上のチップの力を本質的に一定に維持する。

第6図のチップセンサ

他の実施例においては、XYZ走査器22が片持ちレバー基体18を支持し、サンプル20よりはむしろチップを移動する。固定ステージ76,78を交換機構を介してXYZ走査器22とサンプル20に取り付け粗位置決めを行なう。XYZ走査器22は、チップの走査においてレーザー光をSILプローブ10の軸上に維持するため焦点レンズを支持できる。チップ走査器74の第1の利益は、直径12"のシリコンウェハのような大きなサンプルを走査する能力を有することである。

第7図のSILプローブ上の薄フィルム

薄い金属フィルムは高い効率で光を散乱でき、弱い信号をより良く検出できる。小さな金属粒子からの強い散乱光は光の波長よりも粒子サイズによって定められる面積において光のコントラストを作る。この場合、ナノメートルレベル以下の極端に高い横方向解像度の光学イメージングを作ることができる。

SILプローブ10によれば、従来の孔なし近視野光学顕微鏡を改良できる。SILプローブ底面をナノメートルレベルの粒子サイズの光散乱材料で被覆し、またはSILのチップに小さな粒子を付けることにより、信号レベルをより多くし、背景レベルを減少した改良孔なし近視野顕微鏡を得ること

とができる。

散乱光信号を感度良く検出するため被覆SILプローブ10を干渉計と一体化ならしめる。チップとサンプルの相互作用による信号波と参照面からの参照波を干渉できる。この干渉信号の位相と振幅はチップとサンプルの相互作用を示す。AFMの軸と従来の顕微鏡のレバーからの背景は消される。更に減衰視野と小さなスポットサイズはサンプル20から散乱される背景を減少する。従って、光検出器42に隔る散乱光の多くは有用な信号である。SILプローブ10のデザイナーリングとデザイナー周波数における光信号48の検出は更に信号を改良する。例え

ルミニウム突出パターンの最小サイズは100nm以下である。

532nmのグリーンレーザーを従来の顕微鏡対物レンズ（ニコン50×0.45NA、長作動距離）を通してSILプローブに照射し、反射光強度をホトダイオードでモニタした。デジタルインストルメントナノスコープ111aSPM解像器ラスターでサンプルを走査し、ホトダイオード信号をアナログ入力とした。テストサンプル上の横方向の解像度の測定値は150nmで、理論的解像限界は130nmであった。430nmのブルーレーザーを用いたときの立方晶形ジルコニウムSILプローブのための理論的解像度限界は110nmである。比較のための550nm（光吸収のためのカットオフ波長）の波長で3.5の屈折率を有するGaP（ガリウム燐化物）SILプローブの理論的解像度限界は90nmである。

ファイバーカップラーを有する第4図の実施例

レーザー源38は顕微鏡に直接取り付けられないため、ファイバーカップリングは、質量のあるテーブルトップレーザー源38を使用できる。第4図に示すようにレーザー源38と光検出器42はファイバー54によって接続できるから、レーザー源38をファイバー結合とし、光検出器42を好ましい実施例（第3図）のモード操作できる。

レーザー源38と光検出器42とを単一モードファイバー54によってファイバー結合したときは、システムを共焦点顕微鏡として操作する。ファイバー54のコアは空間フィルタとして機能し、非フォーカス光を除き焦点深度を減少する。また更に、SILプローブ10によって伝達された（減衰しない）放射光からの信号及びSILプローブ球面から反射した背景光を減少する。

第5図の帰還システム

好ましい実施例における帰還システムは、エリングによる米国特許RE3

4,331号に示されているようなデジタル計算帰還システムである。このシステムは、片持ちレバー14上に設けたチップを有する接触型のカンセサと、チップ位置のレバーの偏角を検出するためのセンサと、3次元圧電走査器とを用いるセンサからの信号をA-Dコンバータに加え、高速デジタル電子回路68で処理

ば、片持ちレバー14を共振周波数で駆動することによるデイズーリングは容易になし得る。基準として共振周波数を用いるロックイン検出は信号対ノイズ比を十分に改良する。また、反射光を使用すれば、透明及び不透明サンプル20のイメージングを行なうことができる。

表面プラズモン共振イメージングもまたSILプローブ底面上の薄い金属フィルムによって可能となる。表面プラズモンは単一層レベル以下で表面特性に極端に感応する。SILを照明する円錐内の幾つかの光はチップ近くのプラズモン共振を励起する。SILプローブ10がサンプル面を走査したとき、プラズモン共振の角度における光の強度をモニタすることによって表面特性における極端に小さな変化を検出することができる。

SILプローブ10が光を集めたとき、チップ近くの小さな区域を除いて底面をカバーした薄い不透明フィルムは背景及び迷光を消す。このことは、従来の傾斜したファイバー近視野プローブ上に孔を有する不透明被覆を使用することと等しい。

金属フィルムの代りに、高屈折率の絶縁材料のフィルムを用いてもSIL内のスポットサイズを減少でき、短い波長によって横方向解像度を改良できる。

要約

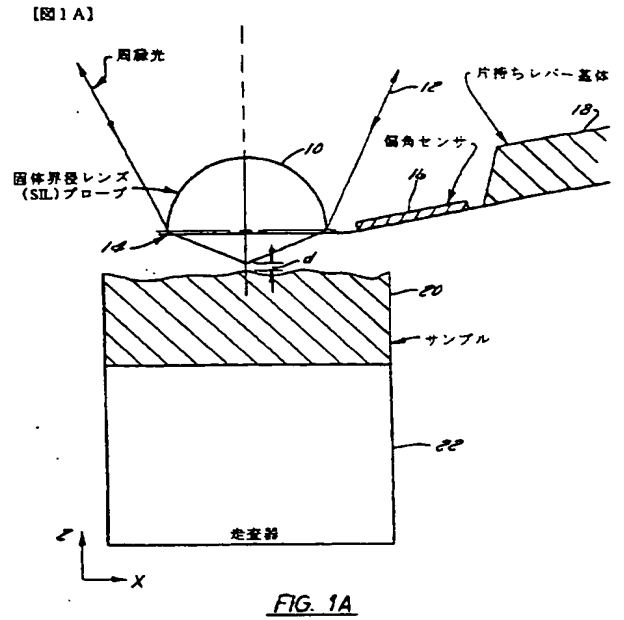
SILプローブ10の操作理論は、傾斜ウェーブガイドプローブとは基本的に異なる。傾斜した光学ウェーブガイドは光を閉じ込め、波長より大幅に小さい制限孔を通して押し込む。この場合の欠点は、光レベルが極端に低く、プローブが機械的に破損することである。これに反し、SILプローブ10は球面で光をフォーカスし、高屈折率材料を用いて波長を短くする。この結果、SILプローブ10は従来の顕微鏡対物レンズ30の開口数を増加する。従って、SILプローブ顕微鏡は従来の光学顕微鏡よりも横方向解像度を高くし、傾斜ウェーブガイドプローブよりも光の生産を高める。

SILプローブ10上の鋭いチップの場合は、平らな、または粗いサンプル面に対しても及びダスト、砂、粒子等により汚染されている場合でも減衰波減衰長さの範囲でこれをサンプル面に近づけることができる。粗状態帰還機構はチップ

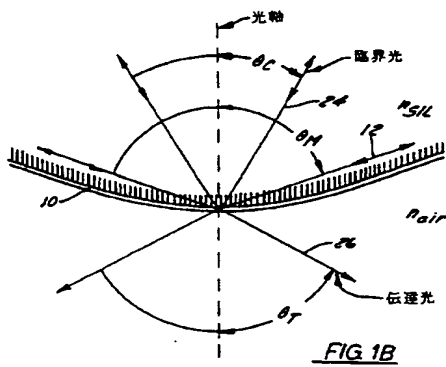
とサンプルの分離を正確に制御する。更に、SILプローブがサンプル面を飛び越すようにすれば、原子力顕微鏡で可能な幅よりもより高速で走査することができるようになる。従って、SILプローブ顕微鏡は原子力顕微鏡における利益に加えて光学顕微鏡で達成できるコントラストメカニズムの広い範囲の利益を有するようになる。

以上本発明の特別な構成を、好ましい幾つかの実施例について記載したが、本発明は同様の機能を達成できる従来既知の他の構成をも含むものとする。

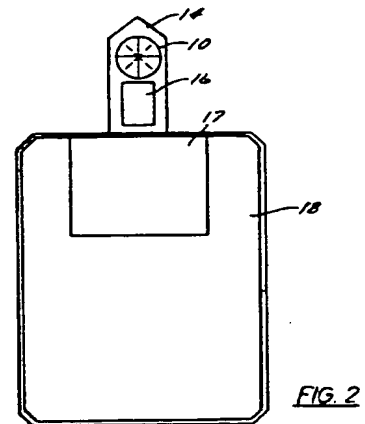
以下の請求の範囲における対応する構成、材料、動作、均等な終ての機構またはステップと機能は、特に請求された構成、材料または他の機構と組合せにより達成する動作をも含むものである。



【図1】



【図2】



【図3】

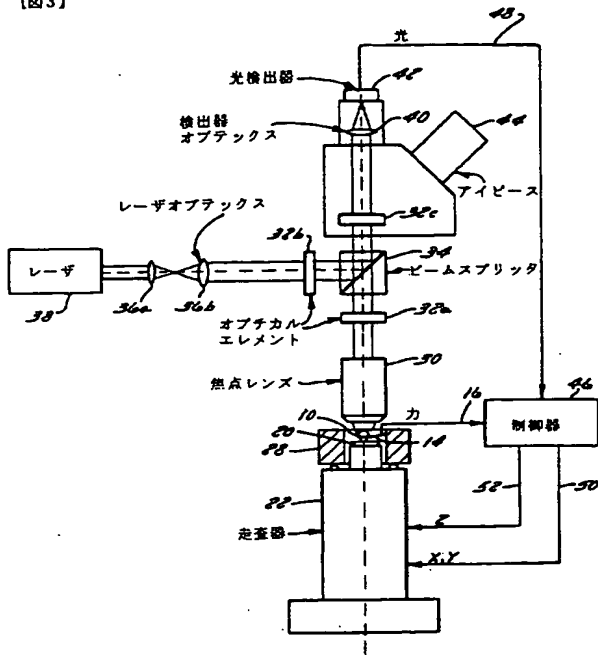


FIG. 3A

【図3】

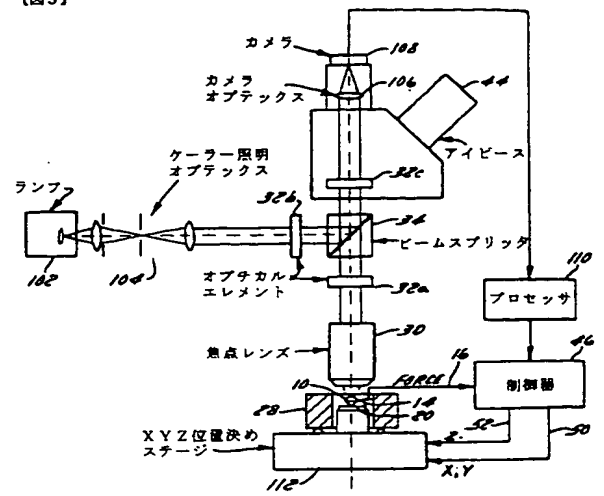


FIG. 3B

【図4】

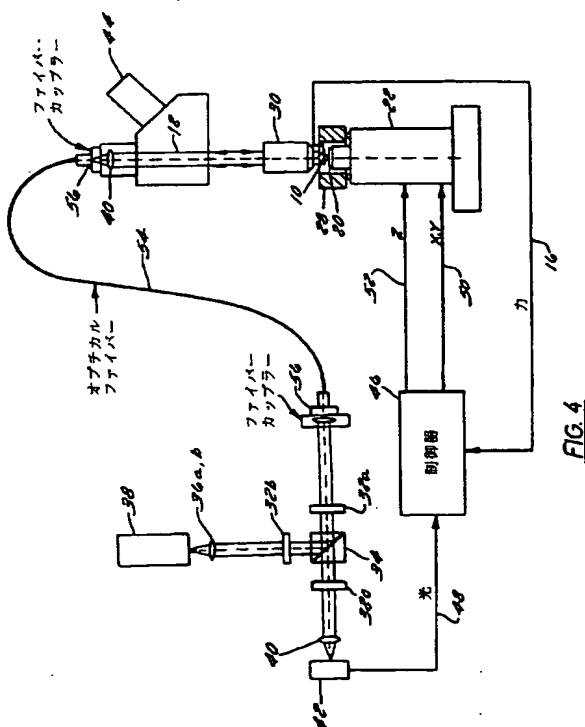


FIG. 4

【図5】

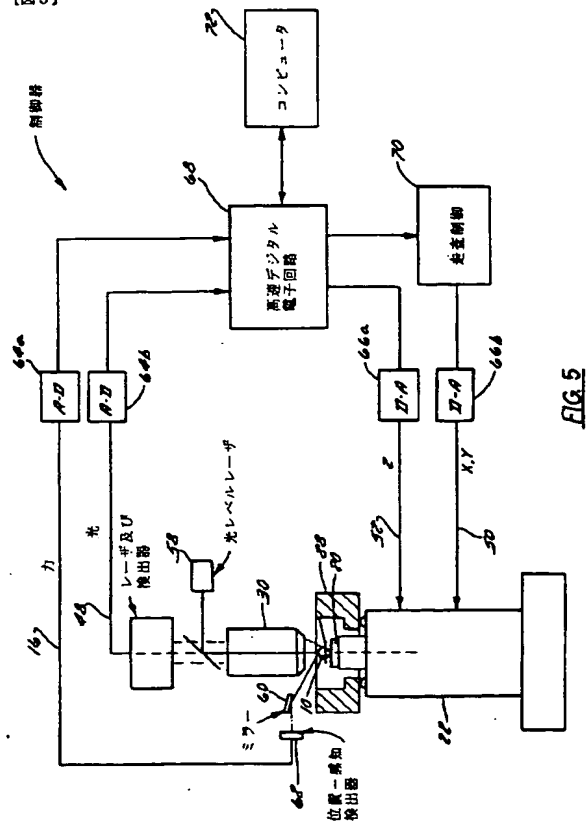


FIG. 5

【図6】

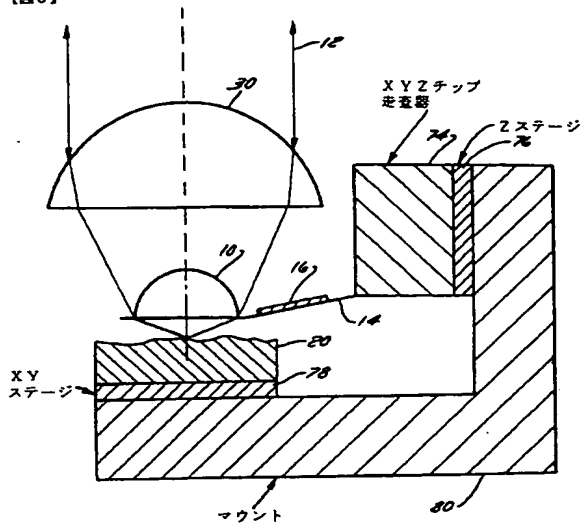


FIG. 6A

【図6】

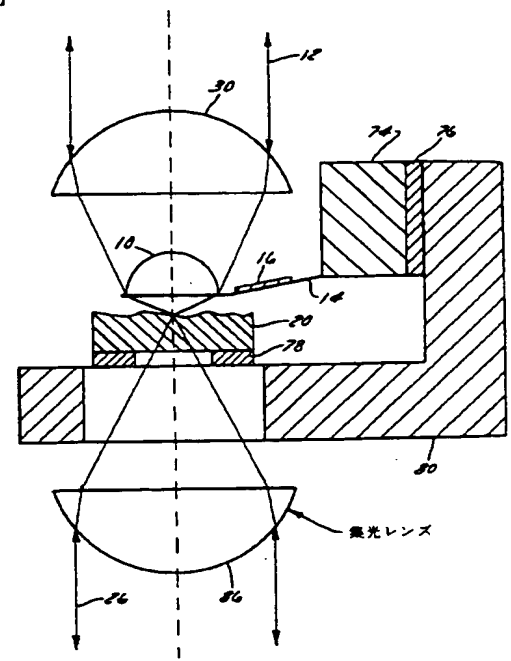


FIG. 6B

【図7】

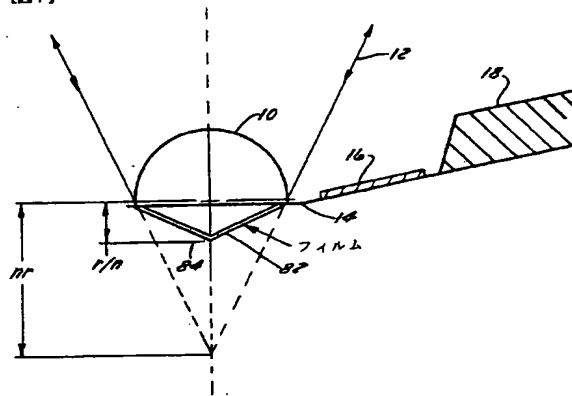


FIG. 7

【手続補正書】

【提出日】平成12年10月27日(2000. 10. 27)

【補正内容】

【図1A】

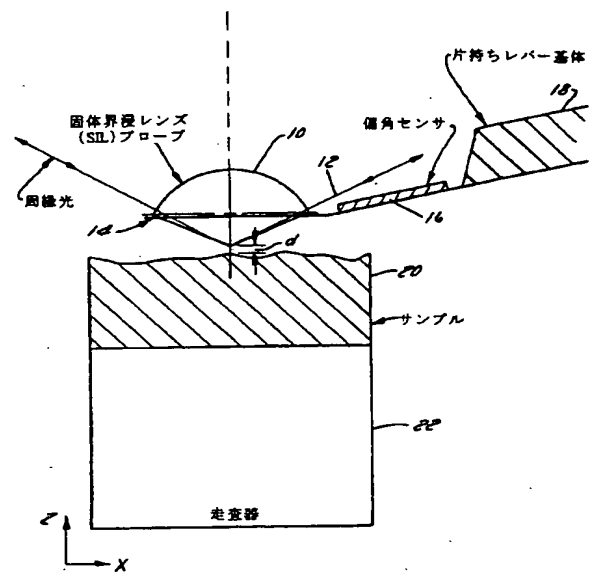


FIG. 1A

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US98/12719
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC(6) : 002B 7/02, 21/02, 21/06 US CL : 250/216, 306, 307, 234; 359/356, 389, 604, 824 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : Please See Extra Sheet. Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched NONE Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) USPTO APS Search Terms: solid immersion lens, microscope, probe tip, scanning probe		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 5,004,307 A (KINO ET AL) 02 April 1991 (02/04/91), see entire document.	1-71
A	US 5,121,256 A (CORLE ET AL) 09 June 1992 (09/06/92), see entire document.	1-71
A	US 5,125,750 A (CORLE ET AL) 30 June 1992 (30/06/92), see entire document.	1-71
A	US 5,497,359 A (MAMIN ET AL) 05 March 1996 (05/03/96), see entire document.	1-71
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" documents defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "B" earlier documents published on or after the international filing date "C" documents which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another document or other stated reason (as specified) "D" documents referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "E" documents published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "F" later documents published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "G" documents of prior art relevance; the claimed invention cannot be considered novel or inventive as considered to involve an inventive step when the document is taken alone "H" documents of prior art relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "I" documents consisting of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 11 AUGUST 1998		Date of mailing of the international search report 08 SEP 1998
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20531 Facsimile No. (703) 305-3230		Authorized officer JOHN LEE Telephone No. (703) 305-0956

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US98/12719

B. FIELDS SEARCHED

Mandatory documentation searched
Classification System:250/216, 305, 307, 234; 359/356, 389, 644, 824; 250/227.11, 235; 359/555, 368, 379, 382, 383, 391, 392, 510, 514,
661, 819, 822, 823

フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷
G 0 2 B 21/06

識別記号

F I
G 0 1 B 11/24

テモト* (参考)
A

【要約の続き】
作する。

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.